

Tagungsbeitrag zu: Jahrestagung der DBG, Kommission I
Titel der Tagung: Horizonte des Bodens
Veranstalter: DBG
Termin und Ort der Tagung: 02. – 07. September 2017, Göttingen
Berichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation) <http://www.dbges.de>

Die rheologische Charakterisierung tidebeeinflusster Böden mittels Daten aus der Mikropenetrometrie

Stoppe, N.¹, Wolter, A.C.², Horn, R.²

Zusammenfassung

Mit Hilfe rheologischer Tests lassen sich mikrostrukturelle Prozesse in Böden und deren Einflussfaktoren relativ einfach und schnell beschreiben und quantifizieren. Dabei wird das visko-elastische Verhalten innerhalb eines Bodenmaterials im Wesentlichen von Textur, Wassergehalt und Trockenrohdichte bestimmt. Allerdings können rheologische Ergebnisse durchaus kontraintuitiv sein, was ihre bodenkundliche Interpretation schwierig machen kann. Da auch der Eindringwiderstand von Böden als Summenparameter u.a. von Wassergehalt, Textur und Trockenrohdichte beeinflusst wird, ist untersucht worden, ob vom Eindringwiderstand unmittelbar auf rheologische Eigenschaften geschlossen werden kann und vice versa. Die Analysen an Bodenmaterial von drei Standorten der Unteren Elbeniederung zeigten, dass sowohl der maximale Eindringwiderstand (Q_{\max}) als auch die Schubspannung bei Erreichen des Fließpunktes (τ_{cross}) bei Trockenrohdichten (ρ_t) $\geq 1,2 \text{ g cm}^{-3}$ durch Entwässerung auf Feldkapazität und durch Erhöhung der ρ_t zum Teil signifikant zunehmen. Außerdem konnte ohne weitere Differenzierung nach Matrixpotenzial oder Trockenrohdichte eine logarithmische Beziehung zwischen Q_{\max} und τ_{cross} hergestellt werden, so dass von gemessenen Eindringwiderständen Rückschlüsse auf die rheologischen Eigenschaften von Böden gezogen werden können.

Dies erleichtert die bodenkundliche Interpretation der rheologischen Ergebnisse und bestärkt die Praxisrelevanz rheologischer Analysen.

Stichworte: Rheologie, Mikromechanik, Mikropenetrometrie, Eindringwiderstand, Bodenstabilität

Einleitung

Die visko-elastischen Eigenschaften von Böden lassen sich relativ einfach und schnell an vergleichsweise kleinen Proben volumina bei verschiedenen Randbedingungen – z.B. unterschiedlich hohen Belastungseinträgen – mit Hilfe rheologischer Tests bestimmen (u.a. Baumgarten 2012, Holthusen et al. 2017, Stoppe et al. in Druck). Dabei hängen die rheologischen Eigenschaften von Böden neben den Testkonfigurationen (Ghezzehei & Or 2001) im Wesentlichen von der Textur, dem Wassergehalt (Stoppe et al. in Druck) und der Trockenrohdichte (Amorós et al. 2010) ab. Neben diesen Haupteinflussfaktoren hängt das rheologische Verhalten bei unterschiedlichem Bodenmaterial ebenfalls von physiko-chemischen Eigenschaften wie z.B. dem Gehalt an organischer Substanz oder der Tonmineralogie ab (u.a. Stoppe 2015, Markgraf et al. 2006).

Auch die Bestimmung von Eindringwiderständen stellt eine leicht durchführbare sowie zeit- und kostengünstige Methode zur Beurteilung der Bodenverformbarkeit dar. Dabei wird auch der gemessene Eindringwiderstand als Summenparameter u.a. vom Wassergehalt, der Trockenrohdichte und der Textur beeinflusst (u.a. Hartge & Bachmann 2004).

Da Eindringwiderstände und rheologische Parameter offenbar in ähnlicher Weise von gleichen Faktoren beeinflusst werden, soll geprüft werden, ob basierend auf diesen Zusammenhängen unmittelbar vom Eindringwiderstand auf die rheologischen Eigenschaften und vice versa geschlossen werden kann. Hierdurch würde einerseits

¹ Institut für Bodenkunde, Leibniz Universität Hannover, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover

² Institut für Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Hermann-Rodewald-Str. 2, 24118 Kiel

die bodenkundliche Interpretation rheologischer Parameter vereinfacht und andererseits die Praxisrelevanz rheologischer Tests bestärkt werden.

Material und Methodik

Es wurde Bodenmaterial von drei Standorten der Unteren Elbeniederung untersucht. An jedem Standort (**Abb. 1**) wurden ein Bodenprofil im vegetationslosen Watt und ein weiteres Profil in der Zone der Pioniererröhrichte (*Schoenoplectus tabernaemontani*, *Bolboschoenus maritimus*) angelegt. Aus beiden Profilen wurden aus 10 cm Tiefe gestörte Beutelp Proben entnommen. In **Tabelle 1** sind ausgewählte Eigenschaften des Materials zusammengefasst.

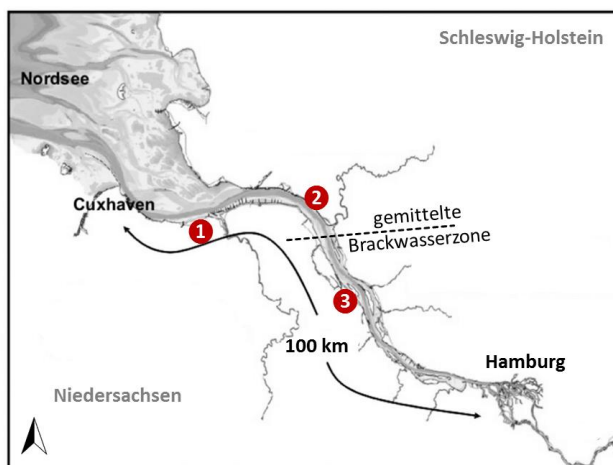


Abb. 1: Lage der Untersuchungsstandorte (Karte verändert nach Freitag et al. 2007).

Sowohl das Deformationsverhalten auf Partikelebene als auch die Eindringwiderstände wurden an homogenisiertem und auf < 2 mm gesiebttem Bodenmaterial bestimmt. Hierfür wurden in kleinen Zylindern (45 bzw. 15 cm³) mit Hilfe eines Lastrahmens (Instron 5569) Proben mit definierter Trockenrohdichte (ρ_t : 1,4, 1,2, 1,0 g cm⁻³) hergestellt. Alle so hergestellten Proben wurden zunächst mittels kapillaren Aufstieg

mit destilliertem Wasser aufgesättigt (Ψ_m 0 kPa). An der Hälfte der Proben erfolgte im Anschluss die Bestimmung der Eindringwiderstände und der viskoelastischen Eigenschaften unter quasi-gesättigten Bedingungen. Die zweite Hälfte wurde vor Durchführung der Mikropenetrometrie und den rheologischen Untersuchungen auf keramischen Platten auf ein Matrixpotenzial von -6 kPa entwässert.

Zur Analyse der viskoelastischen Eigenschaften der Bodenmikrostruktur wurden Amplitudentests (AST) nach Markgraf et al. (2006) im Rheometer MCR 300 (Anton Paar, Ostfildern) durchgeführt. Für die Tests wurden aus den vorbereiteten Zylindern (15 cm³) Messproben von ca. 4 cm³ mit einem Spatel entnommen und im Messspalt des Platte-Platte-Messsystems platziert (n=5). Mittels einer oszillierenden und im Testverlauf zunehmenden Deformation (γ) wurden die interne Probenstruktur unter definierten Rahmenbedingungen (**Tab. 2**) zerstört und die viskoelastischen Eigenschaften erfasst. Vor und nach jeder Messung wurden die gravimetrischen Wassergehalte der jeweiligen Probe bestimmt. Die Bedienung des Rheometers, die Überwachung des Amplitudentests und die Generierung der rheologischen Parameter fanden durch die Software Rheoplus/32 V3.21 statt.

Abbildung 2 zeigt eine schematische Ergebnisdarstellung eines Amplitudentests. Hierin kennzeichnet der linear-viskoelastische Bereich (LVE-Bereich) den Bereich, in dem jegliche Deformation vollständig reversibel ist. Dieser Bereich wird durch einen Grenzwert der Deformation (γ_L) begrenzt, so dass bei Deformationen $\gamma > \gamma_L$ bereits zum Teil irreversible Verformungen der internen Probenstruktur auftreten. Da sich im Verlauf der zunehmenden Deformations-

Tab. 1: Physiko-chemische Eigenschaften des untersuchten Bodenmaterials.

Standort	Textur	Humus (%)	CaCO ₃ (%)	pH (-)	Fe _d (g kg ⁻¹)
1 Balje					
Brack-Mischwatt	Slu	1,7	5,3	7,4	2,2
Brackrohmarsh	Sl3	2,9	5,2	7,6	2,9
2 Hollerwettern					
Brack-Mischwatt	fS	0,6	3,2	7,3	1,5
Brackrohmarsh	Sl2	1,9	2,6	7,4	0,9
3 Abbenfleth					
Brack-Schlickwatt	Su3	3,2	6,4	7,2	2,3
Brackrohmarsh	Su3	2,2	5,3	7,2	1,0

amplitude eine Schubspannung entwickelt bzw. aufbaut, ist das Ende des LVE-Bereichs zusätzlich durch einen Schubspannungswert (τ_{LVE}) charakterisiert. Der Schnittpunkt von Speicher- und Verlustmodul (G' und G'') hingegen kennzeichnet den so genannten Fließpunkt oder „cross-over“. Ist dieser Punkt erreicht, ist die interne Probenstruktur vollständig kollabiert und irreversibel zerstört; eine Rückdeformation ist kaum mehr möglich. Auch der Fließpunkt wird durch einen Deformations- und Schubspannungswert (γ_{cross} und τ_{cross}) charakterisiert.

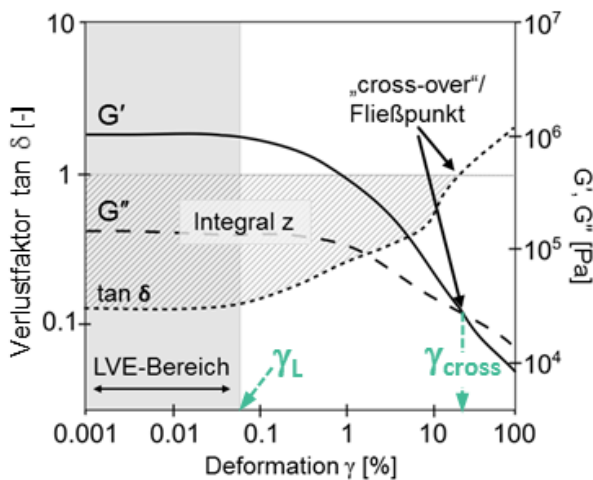


Abb. 2: Schematische Darstellung eines Amplitudentests als Deformationsfunktion einer Probe.

Die Eindringwiderstände wurden mit einer Mikropenetrometernadel, welche am Kraftsensor eines Lastrahmens (Instron 5569) installiert war, bestimmt ($n=5$). Die Testkonfigurationen sind **Tabelle 2** zu entnehmen. Um den Eindringwiderstand anhand eines einzigen Wertes charakterisieren zu können, wurde aus den generierten Kraft-Weg-Wertepaaren anhand der maximal auftretenden Kraft (F_{max}) bezogen auf die Fläche der Konusbasis (A_{Basis}) der maximale Eindringwiderstand (Q_{max}) berechnet (Gleichung 1).

$$Q_{max} \left(\frac{N}{cm^3} \right) = \frac{F_{max} (N)}{A_{Basis} (cm^3)} \quad (1)$$

Die statistische Auswertung erfolgte mit der Statistiksoftware R (Version 3.1.1, R Development Core Team 2013). Um geeignete rheologische Parameter für die spätere Modellparametrisierung auszuwählen, wurden die Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman berechnet. Mittelwertvergleiche wurden basierend auf gemischten

Modellen, in denen der Standort als zufälliger Effekt eingefügt wurde, um den Effekt von Pseudowiederholungen berücksichtigen zu können, als multiple Kontrasttests durchgeführt. Die Berechnung der Regressionen erfolgte mit Hilfe logarithmisch transformierter (rheologischer) Messwerten; die grafische Darstellung wurde linear skaliert vorgenommen.

Tab. 2: Konfigurationsparameter AST und Mikropenetrometrie.

Parameter	
AST	
Plattenabstand	$h = 4 \text{ mm}$
Scherdeformation	$\gamma = 0,0001 - 100\%$
Frequenz	$f = 0,5 \text{ Hz}$ ($\omega = \pi \text{ 1/s}$)
Temperatur	$T = 20 \text{ °C}$
Anzahl Messpunkte	30
Testdauer	ca. 15 Min.
Mikropenetrometrie	
Nadeldurchmesser	$d = 1,6 \text{ mm}$
Konus	30°
Vorschub	$v = 0,08 \text{ mm s}^{-1}$
Vordringtiefe	$h = 10 \text{ mm}$

Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 3 fasst das Ergebnis der Korrelationsanalyse zusammen. Werden alle gewonnenen Daten ohne eine weitere Differenzierung nach Textur, Matrixpotenzial oder Trockenrohdichte analysiert, ergeben sich Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Spearman, die eine signifikante, positive Korrelation zwischen dem maximalen Eindringwiderstand (Q_{max}) und der Schubspannung beim Erreichen des Fließpunktes (τ_{cross}) signalisieren ($r=0,61$ bzw. $\rho=0,75$). Infolgedessen wurde die weitere Auswertung der Daten zunächst auf Q_{max} und τ_{cross} begrenzt.

Da sich eine Gliederung der vorgefundenen Bodenarten in Bodenartengruppen gemäß KA5 in der Vergangenheit insbesondere im Hinblick auf die statistische Auswertung der rheologischen Kenngrößen bewährt hat (Stoppe 2015), wurde eine solche Einteilung auch in dieser Arbeit vorgenommen.

Hinsichtlich der maximalen Eindringwiderstände (Q_{max}) wurde für jede entsprechend definierte Bodengruppe durch Entwässerung auf Feldkapazität ($\Psi_m -6 \text{ kPa}$) unab-

Tabelle 3: Korrelationsmatrix für Q_{max} und rheologische Parameter (Bezeichnungen sind dem Text zu entnehmen). Pearsons r oberhalb, Spearmans ρ unterhalb der Diagonalen ($p \leq 0,05$ *, $p \leq 0,01$ **, $p \leq 0,001$ *).**

	Q_{max}	η_L	τ_{LVE}	γ_{cross}	τ_{cross}	<i>Integral z</i>
Q_{max}	1,00	-0,28 ***	0,20 **	0,15	0,61 ***	0,14
η_L	-0,27 ***	1,00	0,38 ***	0,02	-0,21 **	0,01
τ_{LVE}	0,18 *	0,42 ***	1,00	0,14	0,38 ***	0,14
γ_{cross}	0,08	0,32 ***	0,26 **	1,00	-0,01	0,97 ***
τ_{cross}	0,75 ***	-0,21 **	0,30 ***	0,18 *	1,00	-0,06
<i>Integral z</i>	0,07	0,41 ***	0,30 ***	0,94 ***	0,12	1,00

hängig von der Trockenrohdichte ein signifikanter Anstieg von Q_{max} festgestellt (**Abb. 3 und 4**). Die Entwässerung lässt Meniskenkräfte wirksam werden, wodurch das Einführen der Penetrometernadel erschwert wird und somit höhere Eindringwiderstände erreicht werden. Ursächlich hierfür ist zunächst die Lagestabilisierung des Bodenmaterials durch Wassermenisken. Zusätzlich fehlt der schmierende Effekt des Wassers, wodurch die Reibung zwischen Boden und Penetrometernadel zunimmt. Durch die Reduktion von Wasserfilmen um Mikroaggregate und Partikel steht dem Material aber auch weniger Platz zur Verfügung, um der Nadel beim Vordringen auszuweichen, so dass die Reibung noch verstärkt wird.

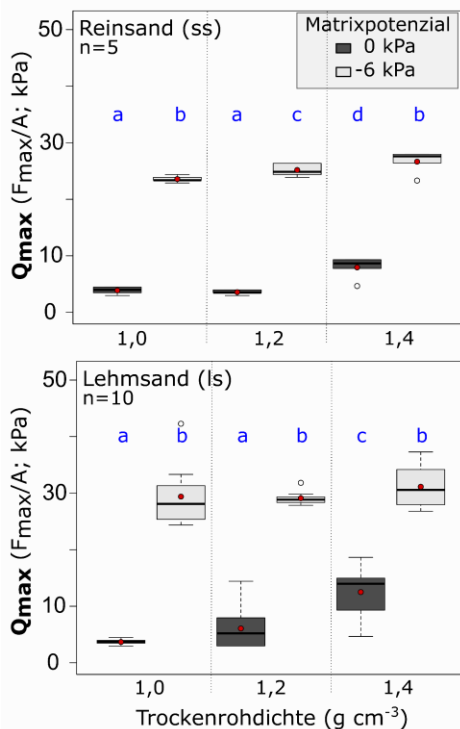


Abb. 3: Einfluss von Matrixpotenzial und Trockenrohdichte auf den maximalen Eindringwiderstand Q_{max} für die Texturgruppe der Reinsande und Lehmsande. Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($\alpha=0,05$), rote Punkte sind Mittelwerte.

Der verstärkende Effekt einer zunehmenden Trockenrohdichte auf Q_{max} wurde für die Gruppe der Reinsande und Lehmsande im quasi-gesättigten Zustand erst ab $\rho_t \geq 1,2$ g cm⁻³ bestimmt. Bei Feldkapazität war allerdings für diese beiden Texturgruppen kaum mehr ein Effekt unterschiedlicher Trockenrohdichten festzustellen (auch wenn bei Reinsanden signifikant verschiedene Q_{max} bei Ψ_m -6 kPa bestimmt wurden) (**Abb. 3**).

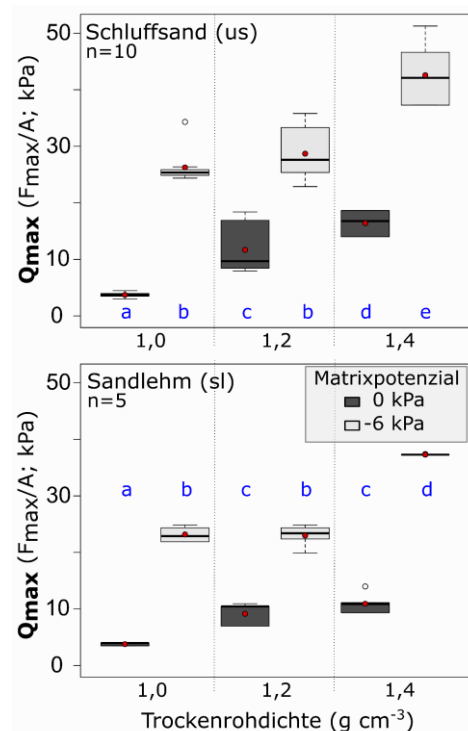


Abb. 4: Einfluss von Matrixpotenzial und Trockenrohdichte auf den maximalen Eindringwiderstand Q_{max} für die Texturgruppe der Schluffe und Sande. Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($\alpha=0,05$), rote Punkte sind Mittelwerte.

In der Gruppe der Schluffe wurden bei Sättigung signifikant höhere Eindringwiderstände mit zunehmender Trockenrohdichten bestimmt. Auch die Sande zeigten im quasi-gesättigten Zustand im Bereich

geringer Trockenrohdichten zunächst eine signifikante Zunahme von Q_{\max} , während eine weitere Erhöhung der Trockenrohdichte keinen Einfluss mehr auf die generierten Eindringwiderstände hatte. Nach einer Entwässerung auf -6 kPa wurden sowohl für die Schluffsande als auch für die Sandlehme bei $\rho_t \geq 1,2 \text{ g cm}^{-3}$ signifikant höhere Eindringwiderstände gemessen (**Abb. 4**).

Die unterschiedliche Reaktion der sandigenen Bodengruppen (Reinsand, Lehmsand) im Vergleich zu den etwas feintexturierteren Gruppen (Schluffsand, Sandlehm) auf unterschiedlich hohe Trockenrohdichten kann durch ein heterogener werdendes Korngemisch erklärt werden. Während es unter quasi-gesättigten Bedingungen in Reinsanden und Lehmsanden während des Einführens der Penetrometernadel aufgrund der überwiegend runden Partikel vermutlich kaum zur Verkeilung (Interlocking) zwischen einzelnen Partikeln kommt, führt das Verkeilen von weniger runden Partikeln in den feintexturierteren Böden schon bei geringen Trockenrohdichten zu höheren Eindringwiderständen. Stabile Mikroaggregate im feintexturierteren Bodenmaterial verstärken diesen Effekt wahrscheinlich noch.

Gleichzeitig weisen feinere Texturen größere Angriffsflächen für Wassermenisken auf, über die deren stabilisierende Kraft wirken kann. Allerdings müssen die hierfür nötigen Kontaktflächen entweder durch Einregelung von Partikeln während der Entwässerung geschaffen werden oder bereits vor der Entwässerung durch eine hohe Trockenrohdichte generiert worden sein. Dieses Phänomen spiegelt sich in den Q_{\max} für Schluffsande und Sandlehme bei Feldkapazität wider. Dagegen scheint bei sandigem Material unabhängig von der Trockenrohdichte durch die Entwässerung eine ähnliche Anzahl von Kontaktpunkten zu entstehen, die zur scheinbaren Kohäsion insbesondere der Reinsande beitragen und welche auch durch größere Trockenrohdichten nicht weiter erhöht werden kann.

Der Zusammenhang zwischen Schubspannungswert bei Erreichen des Fließpunktes (τ_{cross}) und Matrixpotenzial bzw. Trocken-

rohdichte ist in **Abbildung 5 und 6** dargestellt. Für die Gruppe der Reinsande und Lehmsande wurden unabhängig von der Trockenrohdichte durch die Entwässerung auf Feldkapazität signifikant höhere τ_{cross} erreicht. Dagegen treten durch die Entwässerung erzeugte größere τ_{cross} bei Schluffsanden und Sandlehmen erst bei $\rho_t \geq 1,2 \text{ g cm}^{-3}$ auf.

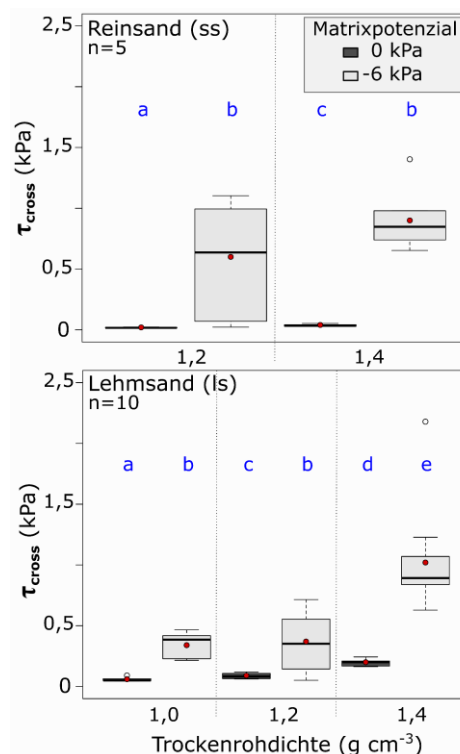


Abb. 5: Einfluss von Matrixpotenzial und Trockenrohdichte auf die Schubspannung bei Erreichen des Fließpunktes τ_{cross} für die Texturgruppe der Reinsande und Lehmsande. Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($\alpha=0,05$), rote Punkte sind Mittelwerte.

Der Effekt einer zunehmenden Trockenrohdichte führte in den sandigeren Bodengruppen (Reinsand, Lehmsand) bei Wassersättigung zu signifikant höheren τ_{cross} . Bei Feldkapazität wurden in diesen Texturgruppen dagegen erst bei $\rho_t \geq 1,2 \text{ g cm}^{-3}$ höhere τ_{cross} erreicht, wobei nur für die Lehmsande signifikante Unterschiede nachgewiesen wurden (**Abb. 5**). In den Gruppen der Schluffsande und Sandlehme ist bei Sättigung hinsichtlich der Trockenrohdichte ähnliches zu beobachten wie bei der Entwässerung: signifikant verschiedene τ_{cross} -Werte wurden erst bei $\rho_t \geq 1,2 \text{ g cm}^{-3}$ erzeugt. Bei Feldkapazität hingegen führte eine Erhöhung der Trockenrohdichte zu höheren τ_{cross} , auch wenn die Werte nicht immer signifikant verschieden sind (**Abb. 6**).

Auch die Zunahme der Schubspannung bei Erreichen des Fließpunktes durch Entwässerung ist auf Meniskenkräfte zurückzuführen. Ebenso wird die Bewegungsfreiheit von Partikeln und Mikroaggregaten bei zunehmender Trockenrohdichte immer weiter eingeschränkt, weswegen größere Schubspannungen entstehen können. Dass die Zunahme im Vergleich zum maximalen Eindringwiderstand aber verhältnismäßig klein ausfällt, ist der oszillierenden Bewegung während der rheologischen Tests geschuldet. Durch die Messung im Oszillationsmodus werden bei jedem Richtungswechsel Porenwasserüberdrücke erzeugt, welche zu einer Destabilisierung der Probenstruktur führen, da diese kaum Zeit haben um sich abzubauen bzw. umverteilt zu werden.

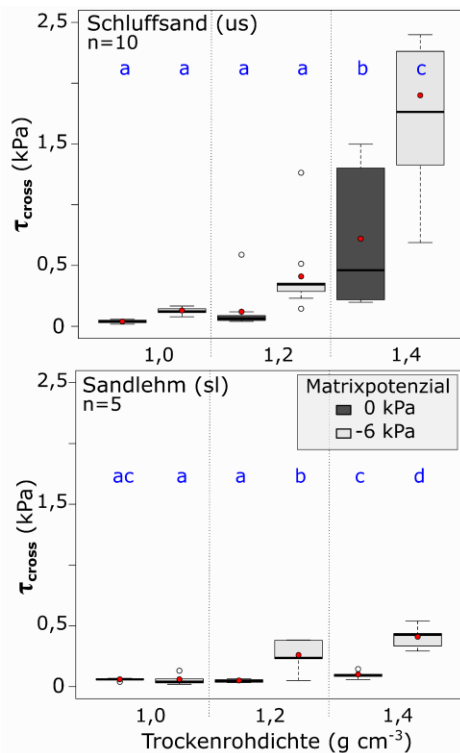


Abb. 6: Einfluss von Matrixpotenzial und Trockenrohdichte auf die Schubspannung bei Erreichen des Fließpunktes τ_{cross} für die Texturgruppe der Reinsande und Lehmsande. Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($\alpha=0,05$), rote Punkte sind Mittelwerte.

Des Weiteren werden plättchenförmige Partikel längs zur Scherrichtung eingeregelt, was einerseits bei Vorhandensein von ausreichend Wasser deren Bewegung erleichtert, andererseits aber auch bei abnehmendem Wassergehalt die Reibung bzw. interpartikulären Wechselwirkungen verstärkt.

Schließlich ist in **Abbildung 7** der direkte Zusammenhang zwischen Q_{max} und τ_{cross}

als logarithmische Beziehung ohne weitere Differenzierung nach Matrixpotenzial oder Trockenrohdichte grafisch dargestellt. Hier konnten für die Gruppen der Reinsande, Lehmsande und Schluffsande die besten Anpassungen an die Messdaten erreicht werden ($R^2=0,71/0,61/0,60$). Aufgrund der hergestellten Beziehung kann außerdem gezeigt werden, dass der Einfluss der Trockenrohdichte auf Q_{max} bei Wassersättigung größer war als bei Feldkapazität. Wohingegen der Effekt der Trockenrohdichte auf die Schubspannung bei Erreichen des Fließpunktes (τ_{cross}) bei Feldkapazität größer war als bei Wassersättigung.

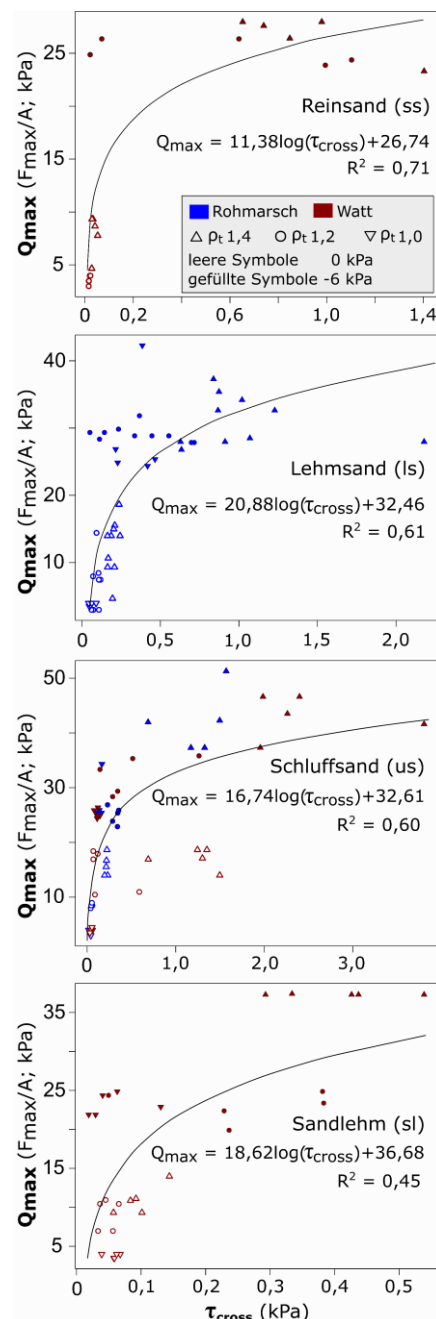


Abb. 7: Logarithmische Beziehung zwischen maximalem Eindringwiderstand Q_{max} und der Schubspannung bei Erreichen des Fließpunktes τ_{cross} für die nach KA5 definierten Texturgruppen.

Fazit

Da sowohl Eindringwiderstand als auch der Schubspannungswert bei Erreichen des Fließpunktes in gleicher Weise von Trockenrohdichte und Wassergehalt bzw. Matrixpotenzial beeinflusst werden, konnte eine direkte logarithmische Beziehung zwischen diesen beiden Parametern hergestellt werden. Hierdurch wird nicht nur die bodenkundliche Interpretation von τ_{cross} erleichtert, sondern erneut die Praxisrelevanz rheologischer Untersuchungen aufgezeigt.

Literatur

- AMORÓS, J.L., BELTRÁN, V., SANZ, V., JARQUE, J.C. (2010). Appl Clay Sci **49** (1): 33-43.
- BAUMGARTEN, W., NEUGEBAUER, TH., FUCHS, E., HORN, R. (2012). Soil Till Res **125**: 80-88.
- FREITAG, C., HOCHFELD, B., OHLE, N. (2007). Coastline Reports **9**: 69-79.
- GHEZZEHEI, T.A., OR, D. (2001). Soil Csi Soc Am J **65** (3): 624-637.
- HARTGE, K.-H., BACHMANN, J. (2004). J Plant Nutr Soil Sc **167** (3): 303-308.
- HOLTHUSEN, D., PÉRTILE, P., REICHERT, J.M., HORN, R. (2017). Geoderma **295**: 129-141.
- MARKGRAF, W., HORN, R., PETH, S. (2006). Soil Till Res **91** (1): 1-14.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2013). R. <http://www.R-project.org/>.
- STOPPE, N. (2015). Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Nr. **106**, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- STOPPE, N., HORN, R. (in Druck). J Hydrol Hydromech **66** (1). doi: 10.1515/johh-2017-0031